第47卷 第4期
2024年4月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 47 No. 4
Apr. 2024

新疆阿克苏温宿大峡谷丹霞地貌特征及成因分析

张 菩, 陈留勤, 邵崇建, 李 文, 杜丁丁

（东华理工大学地球科学学院,江西 南昌 330013）

摘 要: 由于造景岩石普遍为钙质和铁质胶结的砂岩和砾岩,丹霞地貌具有独特的景观特征和成因机制,同时因具有较高的科学和观赏价值而成为备受关注的旅游资源。东南湿润区丹霞地貌的研究程度较高,但是对西北干旱气候区丹霞地貌的研究还比较少见。以新疆阿克苏温宿大峡谷为研究对象,通过野外调查、样品显微镜观察、盐化学和元素地球化学实验以及ArcGIS面积高程积分(Hypsometric integral,HI)方法,探讨该地区丹霞地貌的特征和成因。结果显示:(1) 研究区呈现峡谷、山峰及峰林景观,以发育陡崖泥流林和顶盖型石柱为特色,其造景岩石主要为新近纪河流相红色砾岩和砂岩,硬度较高的砾岩层为形成顶盖型石柱提供了有利保障。(2) 红层位于温宿盐丘附近,岩石含盐量较高,主要的盐类型为氯化物、硫酸盐和硝酸盐。陡崖洞穴风化碎屑物样品中的大部分主量元素相对于表岩迁出,说明干旱气候下化学风化仍较活跃。(3) 面积高程积分显示研究区南部HI值为0.61,处于幼年期,而北部HI值为0.38,处于老年期,整体地貌演化发育阶段差别较大。研究区虽然降水量较低,但河流侵蚀作用明显,同时构造也是影响丹霞地貌演化的主要因素。

关 键 词: 丹霞地貌; 干旱气候; 盐风化; 阿克苏

文章编号: 1000－6060(2024)04－0576－12(0576～0587)

丹霞地貌历经近百年的研究历程,目前已得到国际地貌学界的认可[1-2]。全国已发现1100余处丹霞地貌遗迹,集中分布在中国东南地区、四川盆地地区和祁连-六盘区3个区域[3]。前人通过野外观测及岩石样品抗压强度、抗酸侵蚀、盐化学及元素地球化学等方法[4-9],为深刻理解丹霞地貌基本特征和成因提供了重要材料。有关丹霞地貌的研究大多集中在中国东南地区[4-8],为西北干旱区丹霞地貌研究提供了一定的经验。近年来,随着西北丹霞地貌地质遗迹资源调查和保护利用工作的开展,甘肃、陕西等地区丹霞地貌的研究取得了显著进步。齐德利等[9]通过测年分析,计算了崆峒山各景点的丹霞地貌年龄和地壳抬升速度,为解决地层归属争议提出了新观点。李通国等[10]分析了兰州周边各时代红层的分布特征及沉积环境,提出了兰州红层地貌的旅游价值及开发前景。彭小华等[11]调查了延安地区丹霞地貌地质遗迹,从构造、地层、岩性等角度出发,结合外营力因素讨论丹霞地貌的发育机制。潘志新等[12]通过野外考察,分析陕北丹霞地貌形成的地质构造和岩石特征,并与美国西部羚羊峡进行了对比。Chen等[13]在对陕北永宁山不同方向陡崖上的洞穴微地貌进行观察的基础上,通过样品显微结构观察和盐化学及元素地球化学研究,认为微气候是洞穴分布和空间组合方式差异的主要因素。丁华等[14]对陕北地区丹霞地貌地质遗迹的开发利用价值进行了有益探讨。新疆地区主要侧重地质遗迹资源的旅游开发[15],对丹霞地貌成因的解释较少。

新疆阿克苏温宿大峡谷位于亚欧大陆温带干旱区,发育陡崖、方山、峰林等丹霞地貌景观,是西北干旱气候区丹霞地貌的典型代表,具有较好的科学研究价值及旅游开发前景。本文通过野外观察、

收稿日期: 2023-04-13; **修订日期:** 2023-06-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(42361002,41772197);江西省社科基金"十四五"(2021年)地区项目(21DQ45)资助

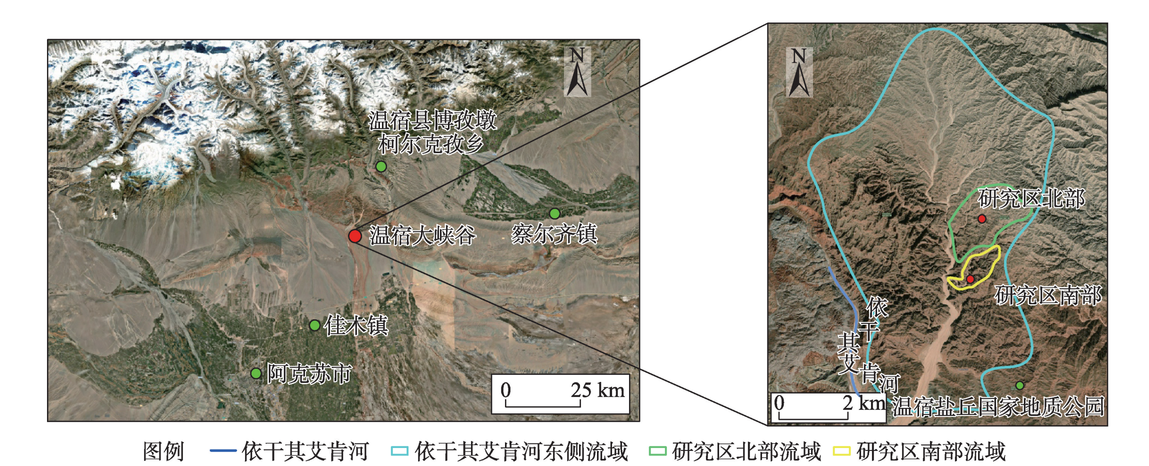
作者简介: 张菩(1999-),女,硕士研究生,主要从事丹霞地貌成因研究. E-mail: 2021110104@ecut.edu.cn

通讯作者: 陈留勤(1983-),男,博士,教授,主要从事红层沉积环境及丹霞地貌成因研究. E-mail: chenliuqin@ecut.edu.cn

样品显微分析、盐化学和元素地球化学实验以及ArcGIS面积高程积分方法，总结温宿大峡谷红层发育特征，并分析丹霞地貌特征及主控因素，以期更好地理解丹霞地貌的成因，同时为有效保护、合理开发利用西北干旱区丹霞地貌地质遗迹资源提供参考。

1　研究区概况

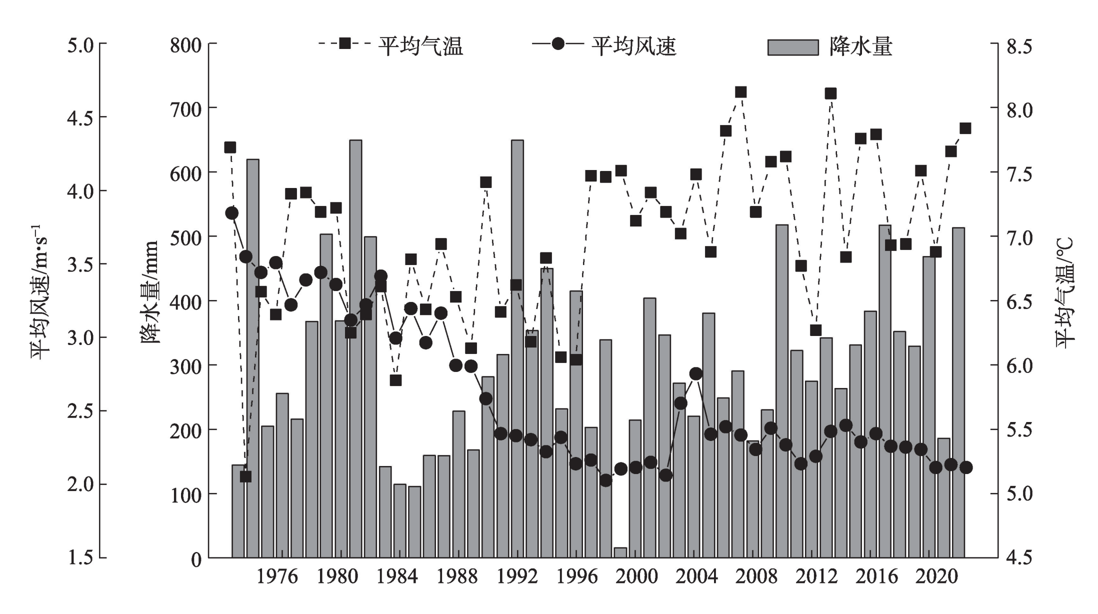
温宿大峡谷位于新疆维吾尔自治区阿克苏地区温宿县境内（图1），总面积为200 km²，地理位置介于80°28′50″~80°45′01″E，41°33′54″~41°44′35″N之间。研究区为典型的温带大陆性干旱气候，降水稀少，蒸发量大，气候干燥，无霜期较长。阿合奇县气象站（78.45°E，40.93°N）有关温宿大峡谷近50 a的气象数据（图2）显示：研究区年均气温基本分布在6.5~7.5 ℃，年均气温变化呈“W”字型，5~7 a为一个周期，有逐渐变暖的趋势，其中最低年均气温为5.14 ℃（1973年），最高为8.12 ℃（2007年）；年降水量变化幅度较大，其中年降水量最低为15.75 mm（1999年），最高为649.48 mm（1981年和1992年），与过去40 a对比，近10 a的降水总量有逐渐增多的



注：地形数据来源于地理空间数据云网站（http://www.gscloud.cn/）。

图1　温宿大峡谷地理位置图

Fig. 1　Geographical location map of Wensu Grand Canyon



注：数据来源于小麦芽-农业气象大数据，网址为http://www.wheata.cn/。

图2　1973—2022年阿克苏地区温宿县气候要素特征

Fig. 2　Characteristics of climate elements in Wensu County of Aksu Prefecture from 1973 to 2022

趋势；平均风速总体呈下降趋势，最低为2.03 m·s^{-1}(1998年)，最高为3.87 m·s^{-1}(1973年)。20世纪70年代到80年代末的平均风速较大，90年代初到21世纪初平均风速相对下降，2002年为转折点，2003—2022年的平均风速相比于20世纪90年代，整体有所增长。

研究区在大地构造位置上处于天山南麓与塔里木盆地北缘之间的中新生代坳陷地带——库车山前拗陷[15]。温宿大峡谷沿线地层均可见较为密集的节理发育，主构造线走向呈NW-SE展布，地层总体向NE倾斜。邻区范围内地层分布有新近系中新统红色泥岩、砂岩夹石膏层；上新统褐红色砂岩和砾岩；古近系的古新统与始新统并层红色泥岩、砂岩及早白垩世褐红色泥岩、砂岩和砾岩[16]。温宿大峡谷范围内出露的地层主要为新近系上新统、中新统地层，周围河网密布，形成一定厚度的河流相碎屑沉积，主要岩性为红色砾岩和砂岩以及少量泥质岩。研究区分别位于2个支流区域范围内，因此将其划分为南、北2个部分，靠近研究区北部存在断层(图3)。



注：据1:200000区域地质图，数据来源于全国地质资料馆(http://www.ngac.org.cn)。

图3 温宿大峡谷地质图

Fig. 3 Geological map of Wensu Grand Canyon

2 数据与方法

在温宿大峡谷进行野外考察，采集样品合计8件。其中，AKS-1、AKS-2、AKS-3为风化碎屑物；AKS-4是采自垮塌陡崖的新鲜表岩，岩性为红色中-细粒砂岩；AKS-6和AKS-7分别是采自同一洞穴内部和外部的样品，洞内有盐析出，洞外干燥疏松；AKS-8和AKS-9采自同一洞穴，内部样品AKS-8为风化碎屑物，外部样品AKS-9为粗砂岩。

选取4件(AKS-2、4、6、7)砂岩样品在扫描电镜下进行微观分析，研究样品的表面形态特征，结合能谱仪(EDS)分析点位图像及元素能谱图，根据元素含量及原子百分比，半定量分析样品的主要化学组成。另外，将8个样品(AKS-1、2、3、4、6、7、8、9)磨成粉末烘干后与去离子水按1:5混合制成溶液，震荡72 h，取上清液完成盐化学实验。使用雷磁DDSJ-308A电导率仪测量溶液电导率，利用电感耦合等离子体发射光谱仪和离子色谱仪测定溶液中主要阴、阳离子浓度，判断盐类型。通过X射线荧光光谱(XRF)测量样品的主量元素含量，探讨洞穴发育过程中的岩石微观风化机制。利用面积高程积分(Hypsometric integral，HI)法，运用GIS水文分析技术对研究区DEM数据(30 m分辨率)的流域信息进行提取，分析温宿大峡谷的地貌演化阶段。

3 结果与分析

3.1 丹霞地貌特征

温宿大峡谷地层产状较缓，丹霞地貌景观类型多样(图4)，主要有山峰、陡崖、石柱、峰林、峡谷及洞穴等。山峰被陡崖围限，由互相分离的山峰群构成的峰林景观比较突出，也可见大量造型生动的石柱、石菇、泥流林、凹槽、穿洞、壁龛等微地貌景观。在垂直剖面(陡崖)上，沉积岩特有的层理构造显著，指示了纵向上沉积物粒径的变化。

研究区内顶盖型石柱和泥流林这2种丹霞地貌极具特色。顶盖型石柱指在石柱的顶部覆盖着一层砾岩，石柱主体部分主要为紫红色砂岩，而顶盖为灰紫色砾岩，后者泥质含量相对较低，胶结较致密，硬度较大，抗风化能力较强，因而风化后形成相对突出的顶盖。泥流林指覆盖在陡崖上的薄膜状泥质物，它们是降雨期间由山体顶部边缘流下的泥



注：图(a)为温宿大峡谷局部景观，峡谷两侧红崖直立，远处可见高耸石柱；图(c)为宫殿状丹霞地貌坡面组合，在西部比较典型；图(d)~(f)为较小规模的石墙、石柱，石柱顶部有抗风化能力较强的"砾岩顶盖"，其中图(d)中央短石柱顶上为一个巨砾，被称为星空异石；图(g)为孤立石柱，周围为松软的风化碎屑，含有丰富的盐；图(h)为图(g)石柱底部风化碎屑的放大照片，表面一层白色盐霜；图(i)为陡崖上的泥流林(泥乳膜)。

图4　温宿大峡谷丹霞地貌特征

Fig. 4　Danxia landforms characteristics of Wensu Grand Canyon

水快速失水形成的，看似微型树林而得名，也有人称为泥乳膜[17]。

3.2　样品微观结构特征

参考前人的研究方法[18-20]，将岩石表面光滑度、孔隙裂隙量、颗粒感作为分类标准，对4件砂岩样品(AKS-2、AKS-4、AKS-6、AKS-7)的117幅扫描电镜照片进行分类，总结岩石颗粒表面结构和分析其形态特征，统计结果如图5。

在扫描电子显微镜下，岩石碎屑颗粒磨圆度较好，分选性较差，颗粒表面粗糙，孔隙发育(图6a)伴有裂缝产生，常见化学溶蚀坑穴(图6b)、二氧化硅花(图6c)和颗粒表面刮磷(图6d)，具有一定的方向性，碎屑颗粒表面多被风化产物(如泥质、胶结物、黏土矿物等)覆盖，表面有盐晶体附着。

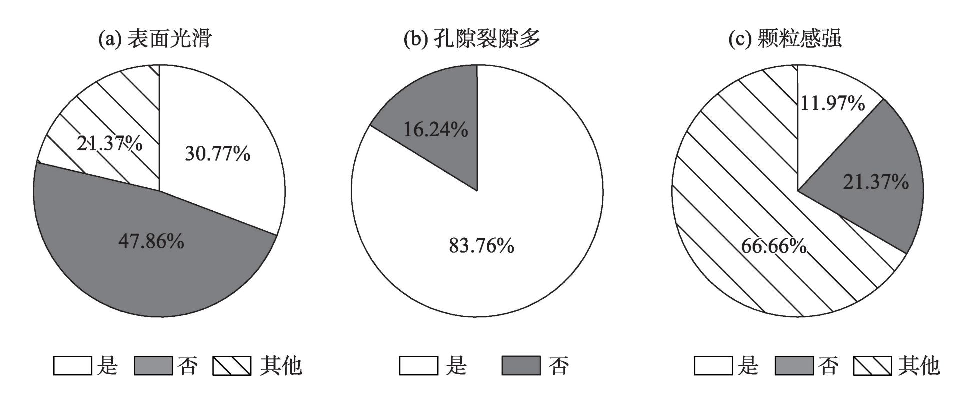


图5　砂岩样品颗粒表面结构特征

Fig. 5　Surface texture characteristics of sandstone samples

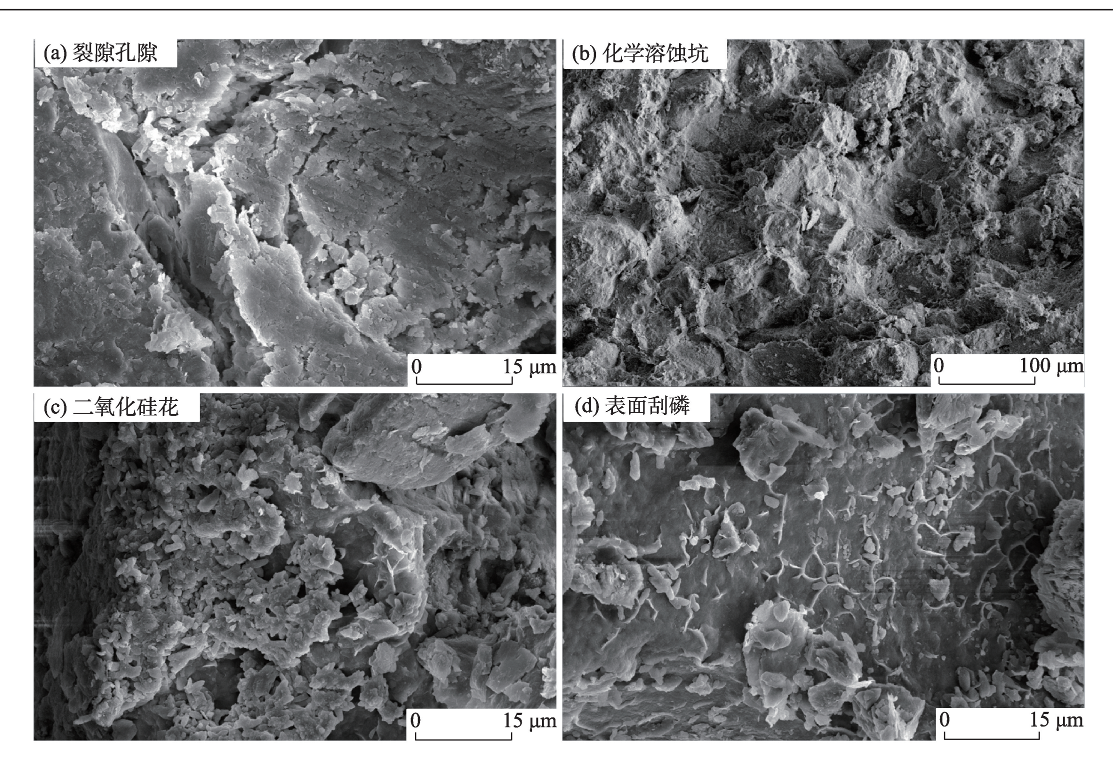


图6 砂岩样品微观形貌特征

Fig. 6 Microscopic morphological characteristics of sandstone samples

样品的面扫描图像(图7a)显示了Si、O、Fe、Ca、K、Mg各元素的富集区,视域(图7a1)中Si元素分布最广泛。样品EDS的X射线能谱图显示,以O和Si元素为主,但是部分能谱图显示有Na、K和Al等元素出现。根据已知的元素比例及化学元素的特性,可对矿物成分开展定性与半定量分析。去除C元素的干扰,Na、K的原子半径相近,含量可以相互替代,K、Al、Si的原子比例接近1:1:3,所以可判断为钾长石(图7b)。基于EDS半定量计算样品的元素含量及原子百分比,结合160个点位的能谱图进行分析,研究样品中含有石英、钠长石、钾长石、高岭石和方解石等。

3.3 样品盐化学实验

样品电导率结果显示最大值与最小值相差很大(表1)。相比之下,采集于洞穴内部的样品AKS-6和AKS-8的电导率远大于外部样品AKS-7和AKS-9。标准差显示与平均值的离散度很大,即研究区不同砂岩样品盐分含量差别很大。AKS-1、AKS-3、AKS-6、AKS-8这4个样品电导率偏高,AKS-8的电导率最大,约是AKS-9的550倍。样品有不同的电导率值,受到风、流水等外动力条件的影响不同。

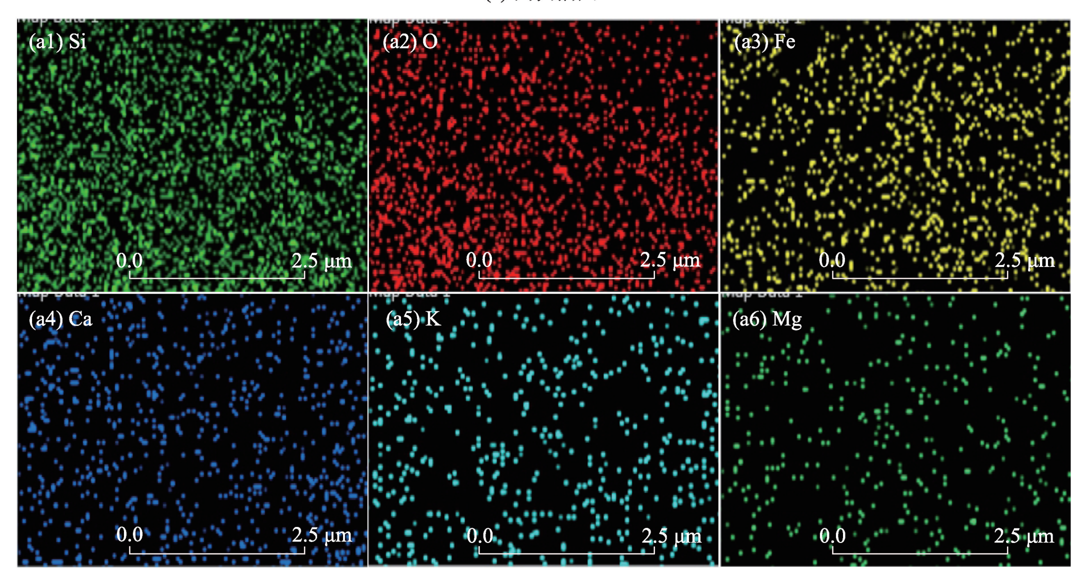
样品电导率数值越高,盐溶液离子浓度越高,两者具有一致性。选取AKS-2、AKS-4、AKS-7、AKS-9 4个样品,实验结果显示主要的阴离子有Cl^-、SO_4^{2-}和NO_3^-,主要的阳离子为Ca^{2+}、Na^+、K^+和Mg^{2+}(图8)。阴离子中Cl^-含量最高,SO_4^{2-}次之,NO_3^-最少;含量最高的阳离子为Ca^{2+}和Na^+,洞穴岩石表面的盐分中NaCl、Na_2SO_4(芒硝)含量较多,并伴随有石膏、KNO_3、$MgSO_4$。所以从阴离子组成来看,以氯化物和硫酸盐为主,从阳离子组成来看,以钙盐和钠盐为主[21]。

3.4 样品元素地球化学特征

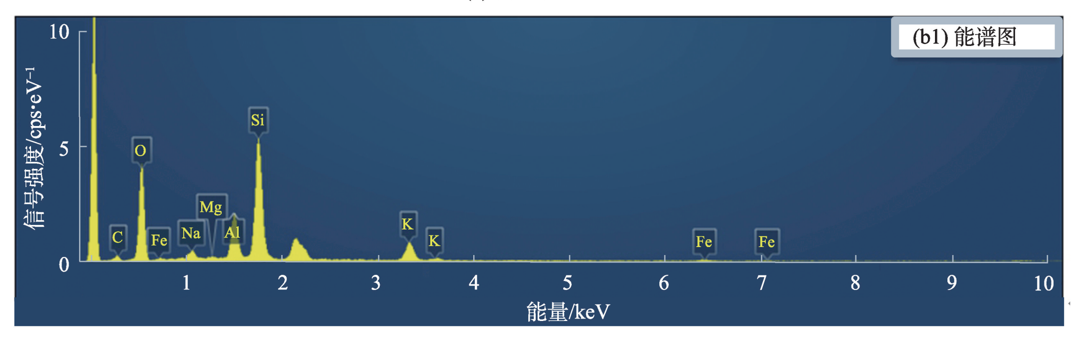
长石类矿物易受到化学蚀变,Ca、Mg、Na等易溶性组分迁移,形成主要成分为Al_2O_3的黏土矿物[22]。样品主量元素测试结果(表2)显示,样品中主量元素都具有SiO_2含量最高的相同特征,SiO_2含量范围为43.67%~74.93%,平均含量约为66.62%,样品中石英含量占很大一部分比例。其次是Al_2O_3,含量范围为5.47%~13.40%,平均含量约为10.44%。烧失量(LOI)质量分数有以下特征:风化碎屑物的值均大于表岩中的值,洞穴内部大于外部。

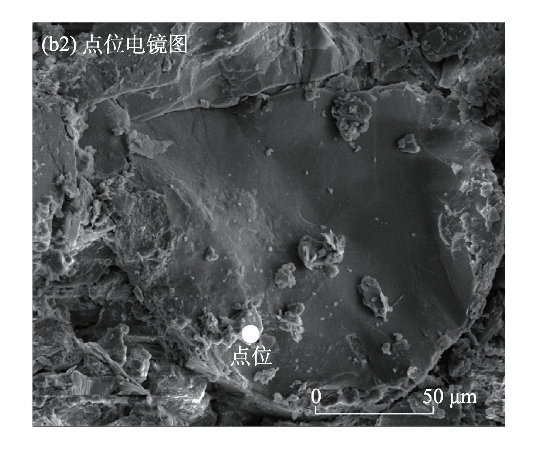
样品AKS-6和AKS-8是在洞穴内部所取的样品,样品AKS-7和AKS-9在洞穴外部所取。以AKS-8和AKS-9为对照组,对比样品中的氧化物含量,洞

(a) 面扫描图



(b) 点分析结果图





(b3) 元素含量比例

元素	质量百分数/%	原子百分比/%
C	5.79	9.75
O	44.79	56.57
Na	1.91	1.68
Mg	0.34	0.29
Al	9.40	7.04
Si	27.22	19.59
K	8.28	4.28
Fe	2.27	0.82
总计	100.00	100.00

图7　EDS面扫描图与点分析图

Fig. 7　Diagrams showing EDS mapping and point analysis

穴外部的Al_2O_3、SiO_2比洞穴内部含量多，洞穴内部的易溶性组分迁移至洞穴外部，说明干旱环境下化学风化仍然起作用。同时，AKS-6和AKS-7对照组也说明了这一点。

岩石中的化学元素在化学风化过程中会发生迁移或富集，内部结构也随之发生变化。风化碎屑物的化学元素相对于原岩的迁移行为计算公式如下[23]：

$$\%change = [(X_s/I_s)/(X_p/I_p) - 1] \times 100 \quad (1)$$

式中：X_s为风化产物中待检元素的含量；I_s为风化产物中参比元素的含量；X_p为母岩中待检元素的含量；I_p为母岩中参比元素的含量。当主量元素相

表1 样品电导率

Tab. 1 Electrical conductivity of samples

样品编号	电导率/μS·cm⁻¹	样品编号	电导率/μS·cm⁻¹
AKS-1	6430	AKS-7	117
AKS-2	153	AKS-8	63700
AKS-3	3180	AKS-9	116
AKS-4	302	标准差	20495
AKS-6	4400	平均值	9800

对迁移变化率(%change)<0时,代表备检元素X相对参比元素I迁出;当%change>0时,则相对富集。

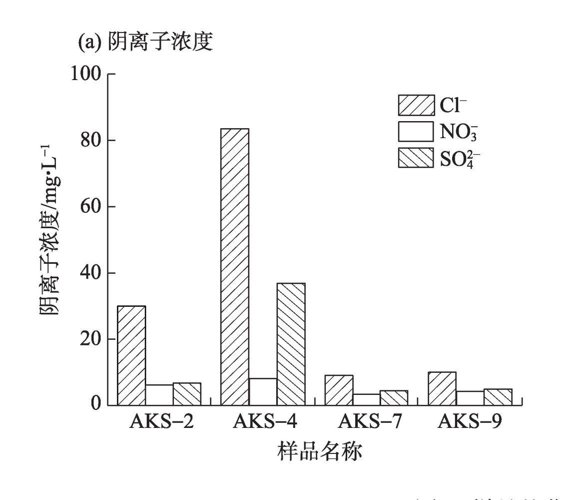
崩塌的新鲜岩石与风化岩石的母岩二者岩性相同,本文以表层岩石(AKS-4)作为母岩,其他样品碎屑(AKS-1、AKS-2、AKS-3)作为风化产物[24]。TiO_2含量在风化过程中几乎不流失,所以选为参比元素计算样品中其他元素的变化率。风化产物与表岩的主量元素相对迁移特征如下图(图9),3个样品中的SiO_2、Al_2O_3、P_2O_5、K_2O及TFe_2O_3均为负值,说明这些主量元素相对于参比元素TiO_2迁出。CaO、Na_2O、MgO元素含量在3个样品中的迁移变化率有所差异,反映了风化产物相对于表岩的元素迁移及不同样品间化学风化程度的差异。

3.5 丹霞地貌演化阶段

Strahler在研究河道侵蚀及相关风化作用形成的地形时提出HI方法,使戴维斯侵蚀循环理论由定性描述进入定量分析阶段[25],流域面较多运用起伏比法[26],最为高效简洁。起伏比法的计算公式为:

$$HI = \frac{H_{mean} - H_{min}}{H_{max} - H_{min}} \tag{2}$$

式中:HI为面积高程积分;H_{mean}为流域内的平均高程;H_{max}为最大高程;H_{min}为最小高程。使用ArcGIS的水文分析技术,对温宿大峡谷DEM数据进行处理,以获取HI分布情况(图10)。HI是侵蚀循环的一种指示[26],侵蚀周期是指将地表侵蚀到基准面所需的总时间。侵蚀周期可分为3个阶段,即老年期(HI≤0.4),流域处于完全稳定状态;平衡期或壮



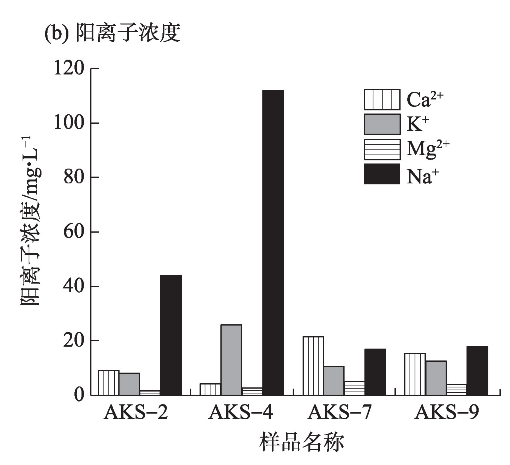


图8 样品盐化学实验结果

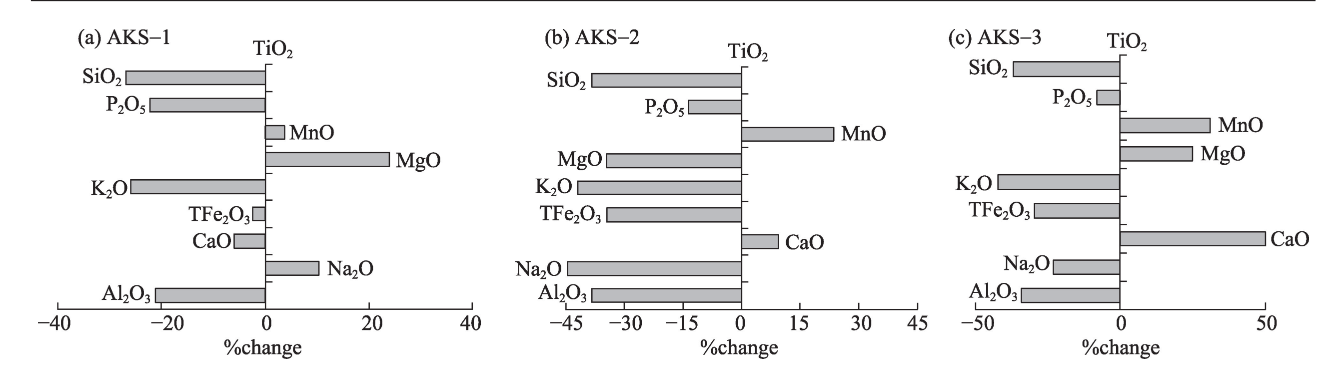
Fig. 8 Sample experiment results of salt chemistry

表2 样品主量元素测试结果

Tab. 2 Test results of major elements of samples /%

样品编号	SiO_2	Al_2O_3	Na_2O	CaO	TFe_2O_3	K_2O	MgO	MnO	P_2O_5	TiO_2	LOI
AKS-1	69.07	13.40	5.32	0.58	2.86	4.65	0.51	0.04	0.05	0.27	3.65
AKS-2	73.32	13.22	3.37	0.85	2.42	4.60	0.34	0.06	0.07	0.34	1.06
AKS-3	70.30	13.22	4.38	1.10	2.44	4.27	0.61	0.06	0.07	0.32	2.79
AKS-4	73.47	13.22	3.75	0.48	2.28	4.88	0.32	0.03	0.05	0.21	0.86
AKS-6	72.10	8.63	2.71	2.80	2.73	2.18	1.78	0.07	0.13	0.43	5.85
AKS-7	74.93	8.92	1.80	2.51	2.93	2.16	1.73	0.05	0.17	0.49	4.39
AKS-8	43.67	5.47	>10.00	7.99	1.57	1.50	1.02	0.03	0.05	0.20	27.02
AKS-9	56.08	7.40	1.35	14.55	3.03	1.94	1.54	0.06	0.08	0.34	13.59

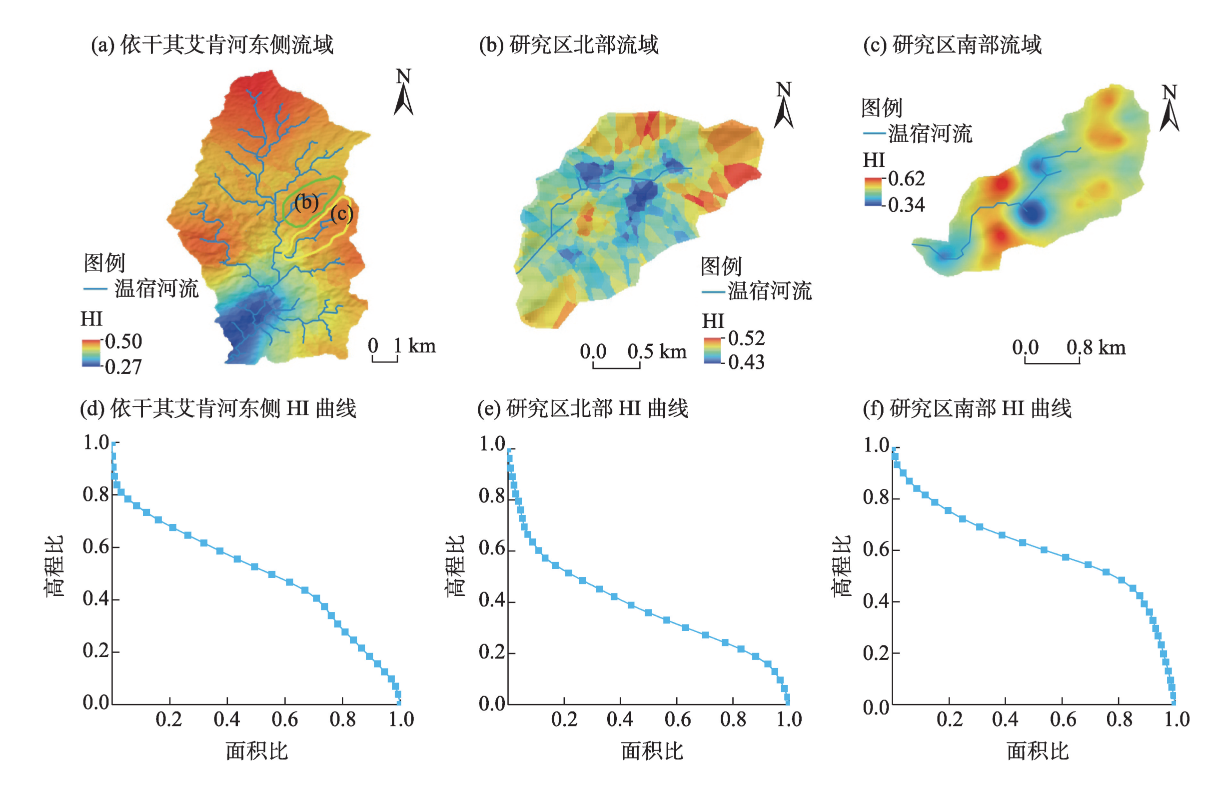
注:LOI为烧矢量。



注：%change为相对迁移变化率。

图9　主量元素相对迁移变化率

Fig. 9　Rate of change in relative migration of major elements



注：图(d)、(e)、(f)横轴为流域中某一高程以上的面积相对集水区总面积的比值，纵轴为某一高程值相对集水区的最大高度差比值。HI为面积高程积分。

图10　温宿大峡谷HI分布及其曲线

Fig. 10　Distribution and curve of hypsometric integral in Wensu Grand Ganyon

年期(0.4<HI<0.6)；以及流域易受侵蚀的不平衡或幼年期(HI≥0.6)。

对依干其艾肯河东侧河流所在流域进行分析(图10a、d)，该流域的HI为0.5，处于壮年期，HI曲线接近S形，地貌发育处于较成熟阶段。进一步对研究区所在的南北2个区域分析，北部区域所在流域(图10b、e)的HI为0.38，处于老年期，HI曲线呈凹形，侵蚀程度较高；南部区域所在流域(图10c、f)的HI为0.61，处于幼年期，HI曲线呈凸形。

4　讨 论

4.1　构造

构造活动是温宿大峡谷丹霞地貌发育的主要内营力。天山南麓山前及库车坳陷因受到北部持续的挤压作用变形强烈，形成断裂带；库车组沉积晚期逐渐影响到隆起区，使其冲断变形；新生代晚期发展为强挤压阶段，研究区的构造变形主要在该时期内形成[27]。由于受到强烈的新构造运动影响，

研究区红层中发育断裂和褶皱，直立节理较为发育。古近纪以来库车前陆坳陷泥膏盐岩的发育可能受喜马拉雅晚期活动的影响。喜马拉雅构造运动中晚期，天山褶皱系造山作用增强，断裂活动加强。库车坳陷自中生代以来经历了多次构造活动，燕山早期构造强度较弱，喜马拉雅晚期挤压应力达到顶峰[28]。上新统地层沉积时期，天山南麓强烈抬升，山前相对下降，挤压应力增强，主要表现为山前凹陷，风化碎屑物在凹陷区沉积，形成一定厚度的地层。峡谷中红层分布清晰，受挤压形成褶皱，被断裂切割的红层经流水侵蚀形成了景观类型丰富多样的丹霞地貌(图4)。

研究区整体HI为0.5，处于壮年期，地貌发育处于较成熟阶段。但是，北部区域的HI为0.38，处于老年期；南部区域的HI为0.61，处于幼年期。鉴于研究区范围较小，近年来的气候因素变化幅度不大(图2)，岩性基本一致(图3)，但是研究区HI出现南部高而北部低的现象，地貌演化程度差别较大，这可能反映了构造的影响。研究区北部靠近断裂带，直立节理发育，红层结构较破碎，导致风化剥蚀速率更快，受河流侵蚀的作用更大，而研究区南部地貌剥蚀速度相对较慢，所以多呈现峡谷景观。

4.2 造景岩石的结构和成分

研究区造景岩石为新近纪红色、黄褐色砾岩和砂岩，胶结程度较低，风化剥落现象明显。在扫描电镜图像(图6)中，砂岩样品碎屑颗粒磨圆程度较好，表面出现鳞片状风化，颗粒间裂隙丰富且孔隙较大。样品AKS-4为从陡崖垮塌掉落的新鲜红色中-细粒砂岩，AKS-9为洞穴外部含细砾粗砂岩。电导率数值显示AKS-4的电导率大于AKS-9，说明细砂岩比含砾粗砂岩更容易被风化。相比于砂岩，砾岩的抗风化能力更强，在顶部凸出形成了研究区奇特的丹霞景观——顶盖型石柱(图4d)。样品离子浓度与电导率实验结果具有一致性，说明离子浓度越高，盐富集程度越高，风化速率越快。样品中主要的阴离子有SO_4^{2-}、NO_3^-和Cl^-，主要的阳离子为Ca^{2+}、K^+、Na^+和Mg^{2+}(图8)。因此，洞穴内的盐分中NaCl、Na_2SO_4(芒硝)含量较多，并伴随有石膏、KNO_3、$MgSO_4$，它们通过结晶膨胀作用破坏岩石结构，导致粒状风化。

风化碎屑物中大部分主量元素的%change为负值，易溶解成分Ca、Mg、Na等含量淋失亏损。岩石风化过程中，长石矿物发生水解后生成黏土矿物，风化产物吸附的水分含量相比表岩有所增加，从而导致LOI质量分数增高[29-30]。风化产物的LOI大于表岩中的质量分数，洞穴内部大于洞穴外部。该风化作用过程导致岩石结构变得疏松，同时指示了化学风化作用。

4.3 气候

研究区地处干旱气候，虽然降水量低，但是流水侵蚀作用依然明显，以物理风化为主。冬季岩石受冻胀的影响相对较大，砂岩颗粒孔隙多且裂隙大，易吸水饱和，岩层含水率较高。寒冷气候加速了岩石内水分的冻结速度，冻胀作用强烈。同时，温宿大峡谷受到一定的风力侵蚀，有部分砾石在重力作用下脱落形成洞穴[31]，砂岩夹层中的风化物碎屑遇到季节性流水形成泥浆，最终在陡崖上形成泥流林(图4i)[17]。

在微气候方面，陡崖上洞穴内外的湿度和温度具有较明显的差别，洞穴内部的相对湿度值一般高于外部，洞穴内部受到外缘的遮挡，相比于洞外很少经受风吹日晒，内部温度极差低于外部[32]。洞穴内部的样品(AKS-6和AKS-8)电导率及离子浓度要比洞穴外部样品(AKS-7和AKS-9)高得多，证明洞穴内部有利的温度和湿度条件更易于水分的聚集凝结，水分在岩石孔隙内运移导致盐的溶解和结晶[33-35]。降水时，洞穴外部边缘的湿度会高于内部，洞穴处于相对干燥的环境，岩石孔隙中的盐溶液过饱和而结晶，有利于盐分的不断积累，所以周期性的干湿交替加快了洞穴的风化进程。

4.4 盐风化作用

研究区红层中富含盐岩夹层，温宿盐丘国家地质公园位于研究区南东约10 km处(图1)。盐矿物的反复溶解、结晶过程有利于加快岩石的风化速率[36]。在渐新世，盐岩层开始结晶沉积，之后经历强烈的喜马拉雅运动发育为盐背斜构造，裂隙、节理发育[37]。新生代晚期膏盐岩在强烈的挤压作用下流动聚集，盐岩层发生脆性变形[38]。同时，研究区盛行的西北季风通过沙尘暴、降水把外部的盐分带到岩石表面，也是重要的盐分来源，它们携带盐降落到岩石表面并随降水渗入到岩石微裂隙或孔隙中[39]，盐类结晶膨胀导致岩石颗粒挤压崩解[40]。本次盐化学实验表明红层岩石及风化碎屑物含有较多盐分，主要的盐矿物包括氯化物、硫酸盐和硝酸盐等。

CaO、Na_2O、MgO等主量元素的相对迁移变化率为正值时，说明岩石受Ca^{2+}、Na^+、Mg^{2+}等离子的含盐溶液的影响。洞穴内部的电导率高于洞穴外部，说明其含盐量高于外部，盐风化速率更快，因此洞穴有向内生长的趋势。

5 结 论

（1）阿克苏温宿大峡谷丹霞地貌是干旱气候丹霞地貌发育的典型地区，以红色山峰、陡崖、峡谷、顶盖型石柱及泥流林为主要特征。造景岩石主要是新近纪红色、黄褐色砾岩和砂岩，为丹霞地貌的发育奠定了物质基础。研究区构造呈NW-SE向，地层总体向NE倾斜，构造在丹霞地貌演化中具有重要作用。HI显示研究区南部所在流域的HI为0.61，处于幼年期；研究区北部所在流域的HI为0.38，处于老年期，指示地貌演化发育阶段差别较大，这可能与北部断裂更加发育导致岩石结构较为破碎易于风化剥蚀有关。

（2）样品扫描电镜图像显示化学溶蚀坑穴发育，主量元素中SiO_2和Al_2O_3含量最高，其他易溶性组分含量较低。与表岩相比，风化碎屑物样品中的大部分主量元素相对迁出，但CaO、Na_2O和MgO等主量元素的相对迁移变化率为正值时，Ca^{2+}、Na^+和Mg^{2+}等离子大量富集，指示了盐结晶作用在岩石风化过程中的重要影响。洞穴内部的电导率和离子浓度均高于洞穴外部，指示盐风化作用通过结晶膨胀破坏岩石结构，主要的盐矿物有氯化物、硫酸盐和硝酸盐。

参考文献（References）

[1] Migoń P. Sandstone geomorphology: Recent advances[J]. Geomorphology, 2021, 373: 107484, doi: 10.1016/j.geomorph.2020.107484.

[2] Migoń P. Geomorphology of conglomerate terrains: Global overview [J]. Earth-Science Reviews, 2020, 208: 103302, doi: 10.1016/j.earscirev.2020.103302.

[3] Yan L B, Peng H, Zhang S Y, et al. The spatial patterns of red beds and Danxia landforms: Implication for the formation factors-China[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 1961, doi: 10.1038/s41598-018-37238-7.

[4] 欧阳杰, 朱诚, 彭华, 等. 湖南崀山丹霞地貌岩体抗酸侵蚀脆弱性的实验研究[J]. 地球科学进展, 2011, 26(9): 965-970. [Ouyang Jie, Zhu Cheng, Peng Hua, et al. Experimental research on vulnerability of Danxia rocks to resistance against acid erosion in Langshan, Hunan Province[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(9): 965-970.]

[5] 彭华, 邱卓炜, 潘志新. 丹霞山顺层洞穴风化特征的试验研究[J]. 地理科学, 2014, 34(4): 454-463. [Peng Hua, Qiu Zhuowei, Pan Zhixin. Experimental study on the weathering features of bedding caves at Mt. Danxiashan[J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(4): 454-463.]

[6] Zhu C, Wu L, Zhu T X, et al. Experimental studies on the Danxia landscape morphogenesis in Mt. Danxiashan, south China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2015, 25(8): 943-966.

[7] 刘东兴, 陈欣, 陈留勤, 等. 江西宁都翠微峰蜂窝状洞穴特征及成因[J]. 山地学报, 2022, 40(2): 196-204. [Liu Dongxing, Chen Xin, Chen Liuqin, et al. Genesis of tafoni in the Cuiwei Peak, Jiangxi Province, China[J]. Mountain Research, 2022, 40(2): 196-204.]

[8] 史月欣, 陈留勤, 杜丁丁, 等. 丹霞山陡坡上风化洞穴的基本特征及成因探讨[J]. 热带地理, 2023, 43(1): 103-114. [Shi Yuexin, Chen Liuqin, Du Dingding, et al. Basic characteristics and genesis of cavernous weathering features on the steep slopes of Danxia landscape in Danxiashan UNESCO Global Geopark[J]. Tropical Geography, 2023, 43(1): 103-114.]

[9] 齐德利, 陈致均, 王随继, 等. 崆峒山丹霞地貌地层归属演化及地貌年龄[J]. 山地学报, 2015, 33(4): 408-415. [Qi Deli, Chen Zhijun, Wang Suiji, et al. Stratigraphic classification, evolution stage and geomorphologic age of Kongtongshan Danxia landform in Pingliang, Gansu, China[J]. Mountain Research, 2015, 33(4): 408-415.]

[10] 李通国, 刘明强, 任文秀, 等. 兰州周边红层地貌地质特征及旅游前景展望[J]. 甘肃地质, 2020, 29(1-2): 85-95. [Li Tongguo, Liu Mingqing, Ren Wenxiu, et al. Geological characteristics and tourism prospect of red beds landscape around Lanzhou[J]. Gansu Geology, 2020, 29(1-2): 85-95.]

[11] 彭小华, 吴昊, 李兴文, 等. 延安地区丹霞地貌类型及发育机制研究[J]. 干旱区地理, 2021, 44(2): 418-426. [Peng Xiaohua, Wu Hao, Li Xingwen, et al. Danxia landform types and development mechanism in Yan'an City[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(2): 418-426.]

[12] 潘志新, 任舫, 陈留勤, 等. 陕北丹霞地貌特征及国内外对比研究[J]. 地理科学, 2021, 41(6): 1069-1078. [Pan Zhixin, Ren Fang, Chen Liuqin, et al. Characteristics of Danxia landform in the northern Shaanxi and a comparison with other Danxia areas in and outside China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41(6): 1069-1078.]

[13] Chen L Q, Migoń P, Guo F S, et al. Cavernous weathering in aeolian sandstones: An example from the Yongningshan Hill of the Loess Plateau, northwest China[J]. Acta Geologica Sinica-English Edition, 2022, 96(5): 1764-1777.

[14] 丁华, 段丰浩, 陈姗姗, 等. 陕北甘泉丹霞峡谷群地质遗迹景观特征与保护利用[J]. 地球科学与环境学报, 2023, 45(2): 362-372. [Ding Hua, Duan Fenghao, Chen Shanshan, et al. Characteris-

tics, protection and utilization of the canyons of Danxia Landscape Geoheritages in Ganquan area of the northern Shaanxi, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(2): 362-372.]

[15] 杨望暾, 郭威, 张阳, 等. 新疆温宿盐丘国家地质公园地质遗迹资源及综合评价[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(9): 193-197. [Yang Wangtun, Guo Wei, Zhang Yang, et al. Geological relic resources and comprehensive valueation of the Salt Dome National Geopark in Wensu County, Xinjiang[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(9): 193-197.]

[16] 马丽芳. 中国地质图集[M]. 北京: 地质出版社, 2002: 342-343. [Ma Lifang. Geological atlas of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002: 342-343.]

[17] 郭福生, 陈留勤, 严兆彬, 等. 丹霞地貌定义、分类及丹霞作用研究[J]. 地质学报, 2020, 94(2): 361-374. [Guo Fusheng, Chen Liuqin, Yan Zhaobin, et al. Definition, classification, and danxianization of Danxia landscapes[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(2): 361-374.]

[18] 李回贵, 李化敏, 李长兴, 等. 应用扫描电镜-X射线能谱研究神东矿区砂岩中结构面的微观结构及元素特征[J]. 岩矿测试, 2018, 37(1): 70-78. [Li Huigui, Li Huamin, Li Changxing, et al. Study on microstructure and elements in the sandstone of the Shendong coal field, Inner Mongolia by SEM-EDX[J]. Rock and Mineral Analysis, 2018, 37(1): 70-78.]

[19] 周尚文, 薛华庆, 郭伟. 基于扫描电镜和X射线能谱的页岩矿物分析方法[J]. 中国石油勘探, 2017, 22(6): 27-33. [Zhou Shangwen, Xue Huaqing, Guo Wei. A mineral analysis method for shale based on SEM and X-ray EDS[J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(6): 27-33.]

[20] 魏小燕, 叶美芳, 朱津蕊, 等. 应用扫描电镜-能谱分析技术研究松辽盆地营城组致密砂岩中火山灰的微观特征[J]. 电子显微学报, 2022, 41(2): 148-153. [Wei Xiaoyan, Ye Meifang, Zhu Jinrui, et al. Microscopic characteristics of volcanic materials in tight sandstone of Yingcheng formation in Songliao Basin by SEM-EDS[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2022, 41(2): 148-153.]

[21] 何文寿, 刘阳春, 何进宇. 宁夏不同类型盐渍化土壤水溶盐含量与其电导率的关系[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(1): 111-116. [He Wenshou, Liu Yangchun, He Jinyu. Relationships between soluble salt content and electrical conductivity for different types of salt-affected soils in Ningxia[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(1): 111-116.]

[22] 冯连君, 储雪蕾, 张启锐, 等. 化学蚀变指数(CIA)及其在新元古代碎屑岩中的应用[J]. 地学前缘, 2003, 10(4): 539-544. [Feng Lianjun, Chu Xuelei, Zhang Qirui, et al. CIA (chemical index of alteration) and its applications in the Neoproterozoic clastic rocks [J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(4): 539-544.]

[23] Nesbitt H W. Mobility and fractionation of rare earth elements during weathering of a granodiorite[J]. Nature, 1979, 279(5710): 206-210.

[24] 王为, 周尚哲, 李炳元, 等. 崂山山顶风化坑化学风化过程的岩石化学与矿物学证据[J]. 第四纪研究, 2012, 32(1): 158-166. [Wang Wei, Zhou Shangzhe, Li Bingyuan, et al. Petrochemistry and mineralogy evidences for the weathering process of the weathering pits on rock surfaces of Mountain Laoshan, China[J]. Quaternary Sciences, 2012, 32(1): 158-166.]

[25] Strahler A H. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography[J]. Bulletin of the Geological Society of America, 1952, 63(11): 1117-1142.

[26] 邵崇建, 李勇, 赵国华, 等. 基于面积-高程积分对龙门山南段山前河流的构造地貌研究[J]. 现代地质, 2015, 29(4): 727-737. [Shao Chongjian, Li Yong, Zhao Guohua, et al. Tectonic geomorphology analysis of piedmont rivers in the southern section of Longmenshan based on Hypsometric Integral[J]. Geoscience, 2015, 29(4): 727-737.]

[27] 何登发, 孙方原, 何金有, 等. 温宿北—野云沟断裂的构造几何学与运动学特征及塔北隆起的成因机制[J]. 中国地质, 2011, 38(4): 917-934. [He Dengfa, Sun Fangyuan, He Jinyou, et al. Geometry and kinematics of Wensubei-Yeyungou fault and its implication for the genetic mechanism of North Tarim uplift[J]. Geology in China, 2011, 38(4): 917-934.]

[28] 曾联波, 谭成轩, 张明利. 塔里木盆地库车坳陷中新生代构造应力场及其油气运聚效应[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 2004(增刊1): 98-106. [Zeng Lianbo, Tan Chengxuan, Zhang Mingli. Cenozoic tectonic stress field and its transport and gas effect in Kuqa depression of Tarim Basin[J]. Science In China (Ser. D Earth Sciences), 2004(Suppl. 1): 98-106.]

[29] 黄日辉, 刘韫, 王为. 广东庙湾岛风化坑的地貌特征及成因[J]. 热带地理, 2016, 36(2): 284-295. [Huang Rihui, Liu Yun, Wang Wei. Topography, morphological characteristics and formation of weathering pit in the Miaowan Island, Guangdong, China[J]. Tropical Geography, 2016, 36(2): 284-295.]

[30] Duzgoren-Aydin N S, Aydin A, Malpas J. Re-assessment of chemical weathering indices: Case study on pyroclastic rocks of Hong Kong[J]. Engineering Geology, 2002, 63(1/2): 99-119.

[31] 陈留勤, 李馨敏, 郭福生, 等. 丹霞山世界地质公园蜂窝状洞穴特征及成因分析[J]. 地质论评, 2018, 64(4): 895-904. [Chen Liuqin, Li Xinmin, Guo Fusheng, et al. Characteristics and origin of honeycombs in the Danxiashan Global Geopark in south China[J]. Geological Review, 2018, 64(4): 895-904.]

[32] Chen X, Chen L Q, Zhang Y H, et al. Lithological and environmental controls on large tafoni along conglomerate cliffs in subtropic humid Danxiashan UNESCO Global Geopark[J]. Journal of Mountain Science, 2021, 18(5): 1131-1143.

[33] Rodriguez-navarro C, Doehne E. Salt weathering: Influence of evaporation rate, supersaturation and crystallization pattern[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1999, 24(3): 191-209.

[34] Guo F S, Chen L Q, Xu H, et al. Origin of beaded tafoni in cliffs of

Danxia landscapes, Longhushan Global Geopark, south China[J]. Journal of Mountain Science, 2018, 15(11): 2398-2408.

[35] Angeli M, Hébert R, Menéndez B, et al. Influence of temperature and salt concentration on the salt weathering of a sedimentary stone with sodium sulphate[J]. Geological Society Special Publications, 2010, 333(1): 35-42.

[36] Goudie A S, Viles H A. The nature and pattern of debris liberation by salt weathering: A laboratory study[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1995, 20(5): 437-449.

[37] 王会萍. 新疆温宿峡谷盐底辟构造与油气聚集[J]. 西安科技大学学报, 2011, 31(1): 59-63. [Wang Huiping. Ochirbat salt diapiric structure and hydrocarbon accumulation in the canyon of Xinjiang Wensu County[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2011, 31(1): 59-63.]

[38] 段云江, 罗浩渝, 谢会文, 等. 塔里木盆地库车坳陷秋里塔格构造带中秋—东秋段盐相关构造特征及变形机理[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(7): 993-1008. [Duan Yunjiang, Luo Haoyu, Xie Huiwen, et al. Salt-related structural characteristics and deformation mechanism of the Zhongqiu-Dongqiu section of the Qiulitag structural belt, Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32 (7): 993-1008.]

[39] 吕洪波, 苏德辰, 章雨旭, 等. 中国不同气候带盐风化作用的地貌特征[J]. 地质论评, 2017, 63(4): 911-926. [Lü Hongbo, Su Dechen, Zhang Yuxu, et al. Landform features of salt weathering in different climatic zones in China[J]. Geological Review, 2017, 63(4): 911-926.]

[40] 徐叔鹰. 干旱区盐风化过程的初步研究[J]. 干旱区地理, 1993, 16(2): 14-20. [Xu Shuying. Preliminary study on the salt weathering process in arid area[J]. Arid Land Geography, 1993, 16(2): 14-20.]

Features and causes of Danxia landscape in the Wensu Grand Canyon of Aksu, Xinjiang, China

ZHANG Pu, CHEN Liuqin, SHAO Chongjian, LI Wen, DU Dingding

(School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China)

Abstract: The bedrock of the Danxia landscape is predominantly cemented by calcareous and ferruginous cements; thus, it has special landscape elements and formation mechanisms. It has become an important tourism resource with much attention because of its high scientific and ornamental values. However, compared with southeast humid areas, little attention has been paid to the characteristics and causes of the Danxia landscape in the arid climate of Northwest China. The Wensu Grand Canyon in the Aksu Prefecture of Xinjiang was selected and investigated to explore the characteristics and causes of the Danxia landscape by field investigation, sample microscope observations, salt chemistry and element geochemistry experiments, and ArcGIS hypsometry. The results are as follows: (1) The study area is characterized by canyon, peak and peak forest landscapes, well-developed mud flow films along slopes, and cap rock columns. The bedrock comprises red fluvial conglomerates and sandstones of Neogene age. The hard conglomerate beds are favorable for the formation of cap rock columns. (2) The study area is located near the Wensu salt dome with a high salt content, and the main salt minerals are probably chlorides, nitrates and sulfates, as inferred from the salt experiment. Most of the major elements of sandy debris samples within caverns migrated compared with the surface rock, indicating active chemical weathering in the arid climate. (3) The hypsometric integral (HI) shows that the HI value of the southern part of the study area is 0.61, which suggests an early stage. The HI value of the northern part is 0.38, which indicates a late stage. Therefore, the geomorphic evolution and development stages differ in the study area. Although the precipitation in the study area is very low, river erosion is obvious. Tectonism is also considered the main controlling factor of Danxia landscape evolution.

Key words: Danxia landscape; arid climate; salt weathering; Aksu